Projeto Integrado de Qualidade de Energia. Normalização, Medição e Tarifação. Tarifação e Medição de Sistemas Distorcidos.

A. C. V. Delgado , CPFL ; H. Arango, C. C. Prado e C. A. M. Guimarães EFE; S. S. Cabral e N. M. Matsuo CED/USP

Resumo - Este artigo apresenta uma nova forma de tarifação para redes distorcidas. A forma proposta é baseada no conceito de ocupação da capacidade do sistema alimentador quando uma carga é alimentada. A ocupação adicional além da capacidade mínima necessária para entregar uma determinada potência ativa é chamada de ocupação supérflua e ela é cobrada, a menos de uma parte admitida como tolerância. O deslocamento e a distorção são separados para efeito da tarifação e a forma de tarifação resultante permite cobrar de forma independente, com pesos diferenciados, os excedentes reativo e harmônico.

Palavras-chave - Tarifas, Harmônicos, Medição de Energia, Protocolos de Medição e Qualidade de Energia.

I - INTRODUÇÃO

Tem surgido nos anos recentes algumas idéias para incluir na tarifação de energia os efeitos do conteúdo harmônico das cargas que poluem o sistema de alimentação. Dentre algumas formas de tarifação que tem sido apresentadas na literatura [1,2,4], podemos citar as tarifações baseadas nas seguintes grandezas:

- potência aparente total
- fator de potência verdadeiro (FPt)
- potência de distorção "D"
- potência ativa harmônica
- fator de potência harmônico ponderado
- potência ativa fundamental

Cada uma dessas formas tem as suas vantagens e desvantagens. Uma forma adequada de tarifação deve possibilitar uma alocação mais justa da responsabilidade pelos custos adicionais no sistema provocados pelas distorções harmônicas.

Na busca de uma forma adequada de tarifação consideram-se os seguintes fatores:

- se a forma de cobrança traduz os efeitos prejudiciais dos harmônicos no sistema e o seu custo envolvido e o grau de incentivo que a cobrança provoca aos consumidores no sentido de diminuir a injeção de harmônicos,
- facilidade com que as medições possam ser efetuadas para se aplicar a nova forma de tarifação.

A. C. V. Delgado é engenheiro do Departamento de Engenharia da CPFL (email: acarlos@cpfl.com.br)

H. Arango, C. C. Prado e C. A. M. Guimarães são professores na Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI (email: mohallen@iee.efei.br)

S. S. Cabral e N. M. Matsuo são consultores do CED/USP (email: cabral@pilar.pea.usp.br e matsuonm@usp.br)

II – PROPOSTA DE TARIFAÇÃO

A proposta apresentada neste artigo para a tarifação de harmônicos é baseada no fator de potência harmônico, de forma análoga à da tarifação de "excedentes" de carga reativa usada atualmente no Brasil. Ela pode ser extendida a redes desequilibradas, mas este artigo trata somente do caso de rede distorcida equilibrada.

No caso da carga reativa, a expressão para a tarifação do "excedente" é:

$$R = \left(\frac{FR}{FP} - 1\right) \cdot (\textit{medição ativa}) \qquad (1)$$

onde:

R: faturamento de excedente

FR: fator de referência (o valor 0,92 é usado no Brasil)

$FP = cos\left[a\,tan\left(\frac{Q}{P}\right)\right]$: fator de potência (deslocamento)

TA: tarifa de medição ativa (energia ou demanda de potência)

Esse procedimento pode ser interpretado como uma aplicação de um sistema de cobrança pela ocupação da capacidade do sistema. Quando uma carga com potência ativa P e fator de potência FP é alimentada, ela ocupa no sistema alimentador uma capacidade igual à potência aparente S=P/FP e há uma ocupação supérflua igual a em relação à mínima capacidade necessária para entregar a potência P. Em termos de FP, a ocupação supérflua é:

$$S - P = \left(\frac{1}{FP} - 1\right) \cdot P \qquad (2)$$

A expressão (1) representa uma cobrança adicional ao faturamento da energia ou potência (demanda) ativa medida de um sistema de tarifação que cobra no mínimo o equivalente ao consumo de uma energia (ou demanda) ativa proporcional a S, ou seja, igual a , quando o fator de potência do consumidor for inferior a FR. Assim, o consumidor com baixo fator de potência paga a parte correspondente à quantidade medida P mais a parte que falta para completar o valor . A parcela restante que falta para completar o total S, isto é, é uma tolerância concedida sem ônus.

O “excedente” a ser pago é:

$$X = FR \cdot S - P = (\frac{FR}{FP} - 1) \cdot P \qquad (3)$$

que mostra o significado da expressão (1).

Se usar o fator de potência verdadeiro (FPt) na expressão (3), com um fator de referência FRt apropriado, obtém-se uma forma de faturamento global de excedentes, que inclui também o efeito de harmônicos.

Mas, esse mesmo procedimento pode ser aplicado para uma tarifação separada de harmônicos, baseado no conceito de ocupação do sistema e desmembramento do fator de potência verdadeiro FPt em sub-fatores:

$$FP_t = FP_1 \cdot FP_H \qquad (4)$$

onde: FPt: fator de potência verdadeiro
FP1: fator de potência fundamental
FPH: fator de potência harmônico

Esses fatores de potência são dados por:

$$FP_t = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \qquad (5)$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{V_1 I_1} \qquad (6)$$

$$FP_H = \frac{1 + \frac{P_H}{P_1}}{\sqrt{1 + THD_I^{\,2}} \cdot \sqrt{1 + THD_V^{\,2}}} \qquad (7)$$

Nesse caso, a ocupação supérflua pode ser expressa como:

$$S - P = (\frac{1}{FP_1} - 1) \cdot P + (\frac{1}{FP_H} - 1) \cdot \frac{1}{FP_1} \cdot P \qquad (8)$$

A expressão para o “excedente” seria:

$$X = (\frac{FR_1}{FP_1} - 1) \cdot P + \left[(\frac{FR_H}{FP_H} - 1) \cdot \frac{1}{FP1} \right] \cdot P \qquad (9)$$

Os termos do lado direito das expressões (8) e (9) não são completamente desacoplados com respeito aos dois fatores de potência. O primeiro termo só depende de FP1, mas o segundo termo depende de FPH e também de FP1, podendo criar a impressão de uma tributação dupla do excedente reativo devido à presença de FP1 em ambos os termos. Do ponto de vista prático é vantajoso e justificável usar uma fórmula de tarifação que apresente separadamente os fenômenos envolvidos, pois isso permitiria uma indicação ao consumidor sobre a causa da tarifação de excedente e permitiria praticar custos diferenciados para cada tipo de efeito. Assim, é proposto o uso da seguinte expressão:

$$X = (\frac{FR_1}{FP_1} - 1) \cdot P + (\frac{FR_H}{FP_H} - 1) \cdot P \qquad (10)$$

Essa modificação não traria diferenças significativas em relação ao total de excedentes e os benefícios pragmáticos obtidos com a aplicação dessa expressão justificam a preferência por esta forma em relação à expressão (9), que, apesar de teoricamente mais correta, traria desvantagens nos aspectos práticos da aplicação.

III. ESTUDOS DE AVALIAÇÃO

A. Grandezas Avaliadas

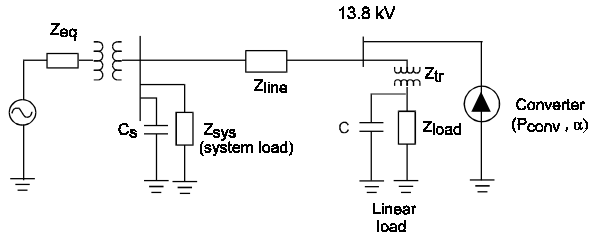
As principais grandezas calculadas nas simulações são:

S_1: ocupação supérflua percentual de deslocamento
S_H : ocupação supérflua percentual harmônica
X_1 : excedente percentual de deslocamento, com FR1 = 0.92
X_H : excedente percentual harmônico, com FRH = 0.98 e FRH = 0.99

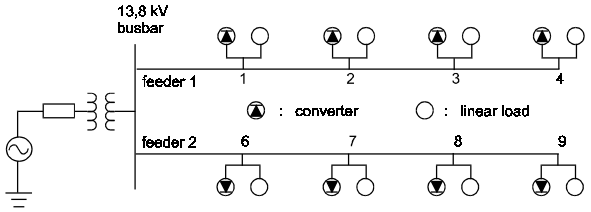
Para comparação , foram realizados cálculos para o caso de se considerar a ocupação supérflua total (FPt) como grandeza de base para tarifação global de excedentes.

B. Modelos para Simulações e Configurações de Rede

As simulações foram variando os principais parâmetros da rede de alimentação, das cargas lineares e carga não lineares. Foram consideradas as configurações mostradas na Figura 1.



Configuração A



Configuração B

Figura 1. Configurações de rede consideradas para as simulações

Com a configuração A estudou-se o comportamento básico das grandezas elétricas e das respostas em termos de tarifação de excedentes harmônicos. Essas simulações foram efetuadas no domínio da freqüência.

Com a configuração B (com fontes múltiplas de harmônicos) verificou-se a resposta do sistema de distribuição em relação aos limites admissíveis de THDV e as grandezas nas entradas de consumidores. Essas simulações foram efetuadas no domínio do tempo.

C. Principais Resultados Obtidos

Os estudos realizados permitem as seguintes conclusões:

Para o alimentador considerado para as simulações, o aumento das cargas não lineares deverá provocar níveis de distorção de tensão que superação do limite distorção de tensão - THDV (de 5% da norma IEEE 519-1992), possivelmente antes do ano 10, ano em que o alimentador teria uma carga inferior ao carregamento final de planejamento de 5000 kW.

Se a tendência de crescimento das distorções harmônicas não for refreada através de meios adequados, possivelmente esses parâmetros virão a ser o fator limitante da capacidade de suprimento do sistema de distribuição, superando as limitações devidas à queda de tensão.

Os bancos de capacitores do alimentador primário estudado exercem grande influência na resposta do sistema a freqüências harmônicas, devido à ressonância introduzida, resultando níveis de distorções de tensão maiores do que com alimentador sem bancos de capacitores. Por isso, ressalta-se a necessidade de que os estudos de instalação de capacitores para compensação reativa ou correção de tensão levem em consideração a questão dos harmônicos, tendo em vista a perspectiva de aumento de CNLs no futuro próximo.

Em rede de distribuição em que há uma grande predominância de um determinado tipo de consumidor (residencial, comercial ou industrial) os níveis de distorção de tensão previstos são maiores, devido ao fato de haver menor cancelamento de harmônicos em razão da diversidade de ângulos de fase de diferentes equipamentos.

O sistema de tarifação de excedente harmônico baseado no conceito de ocupação supérflua harmônica aplicado para os consumidores primários da rede considerada nas simulações realizadas se mostrou sensível às distorções, sinalizando excedentes harmônicas quando as distorções de tensão da rede atingem níveis elevados.

É recomendável o prosseguimento dos estudos utilizando dados de medições de campo em redes reais, o que possibilitaria uma aferição do estudo realizado e uma avaliação mais precisa. Recomenda-se também estender a avaliação à rede de BT, onde o crescimento das CNLs, ocupando uma parte considerável da demanda, como no caso de chuveiros controlados, pode causar maiores níveis de distorção de tensão do que na rede primária, deteriorando a qualidade de energia da rede de distribuição de BT.

IV. ADMITÂNCIA EQUIVALENTE DE DISTORÇÃO

Uma questão que se apresenta quando se trata de medição de harmônicos é a da identificação de consumidores poluidores e não poluidores. O meio mais representativo para isso é o sentido do fluxo de potência ativa harmônica no ponto de acoplamento do consumidor. Mas este método é de difícil implementação usando meios simples e baratos de medição, pois a potência harmônica ativa é uma fração muito pequena da potência ativa fundamental, podendo causar problema de erro de sinal.

Para lidar com esta questão, o procedimento idealizado foi o de classificar os consumidores de acordo com um parâmetro que seja simples de ser avaliado e que permita separar os consumidores em grupos de poluidores e de não poluidores, de uma forma que resulte, no final, uma divisão de responsabilidade estatisticamente aceitável dos custos adicionais no sistema devido a harmônicos. O parâmetro de referência escolhido para ser examinado é a "admitância equivalente de distorção" dada por:

$$Y_{THD} = \frac{THD_I}{THD_V} \qquad (11)$$

Em geral tem-se $Y_{THD} < 4\%$ em cargas lineares e $Y_{THD} > 4\%$ em conversores.

Um valor limite de Y_{THD} poderia ser uma referência para classificar os consumidores num dos dois grupos.

IV. COMENTÁRIOS

As informações apresentadas neste artigo são alguns dos resultados das avaliações que vem sendo realizadas sobre a tarifação proposta. Mais estudos estão em andamento para uma avaliação mais completa, incluindo estudos para a sua aplicação em rede desequilibrada.

V. CONCLUSÕES

A sistemática atual de medição não detecta a ocupação adicional do sistema alimentador devido às correntes harmônicas.

O fator de potência verdadeiro ou a potência aparente total, apesar de englobarem os efeitos do deslocamento e dos harmônicos na ocupação total do sistema, não permite distinção entre os dois fenômenos.

Estudos estão sendo efetuados para a avaliação da possibilidade de aplicação da proposta de tarifação de excedentes desagregada, apresentada neste artigo.

Essa proposta baseia-se no conceito de ocupação supérflua da capacidade do sistema e computa separadamente os efeitos do deslocamento e dos harmônicos.

As principais vantagens dessa forma de tarifação são:

- possibilitar uma alocação mais justa de responsabilidades pelos custos adicionais no sistema devido a harmônicos, através de uma cobrança adequada pela utilização (ocupação) do sistema alimentador pelos consumidores
- sinalizar ao consumidor a causa da taxação de excedente (carga reativa ou harmônicos), permitindo uma ação apropriada para a solução

Os resultados obtidos até o momento indicam em geral uma boa resposta da sistemática proposta. Algumas questões importantes como a definição do valor apropriado para o fator de referência harmônico (FRH), que está relacionada com a tolerância admitida na injeção de harmônicos no sistema, junto com o estabelecimento de uma forma adequada de minimizar eventuais taxações aos consumidores não poluidores fazem parte do estudo em andamento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

[1] McEachern A. et al.: Revenue and harmonics: An evaluation of some proposed rate structures. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 1, Jan. 1995, pp. 474-483.

[2] Czarnecki L. S.: Comments on active power flow and energy accounts in electriacl systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry. IEEE Trans. on Power Delivery, vol.11, n0. 3, July 1996, pp.1244-1250.

[3] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation: *Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Part 1: Concepts, models and simulation techniques.* IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, Jan 1996, pp. 452-465.

Livros:

[4] Mielczarski W.: *Quality of electricity supply & management of network losses.* Puma Press, Melbourne 1997.

[5] Robert A., Deflandre T., CIGRE Working Group CC02: *Guide for assessing the network harmonic impedance.* Electra no. 167, Aug 1996, pp. 97-131.

Seminários:

[6] “Tarifas Reativas Distorcidas: Medição de Energia Reativa na Presença de Harmônicos” - Matsuo, N. M.; Cabral, S. S.; Arango, H.; Prado, C. C.;Guimarães, C. A. M.; Delgado, A. C. V. - Enershow 99 - Feira e Congresso - 1999 - São Paulo.

[7] “A Contratação da Energia Elétrica no Mercado Livre: o Papel de Sua Qualidade” - Arango, H; Abreu, J. P. G; Hermeto, A. E.; Guimarães, C. A.M. Cabral, S. L. S.; Matsuo, N. M., Tahan, C. M. V.; Kagan, N.; Delgado A. C. - III SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - Agosto 1999 - Brasília

[8]"New Electrical Energy Billing Structure for Distorted Networks" - Matsuo, N. M.; Arango, H.; Tahan, C. M. V.; Cabral, S. S.; Delgado, A.C.; Prado, C. C. - 5th. International Conference - Electrical Power Quality and Utilisation - September 15-17, 1999, Cracow, Poland.